PRÉSENTATION POWER POINT

CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODELE SARRA-H POUR LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS DES PRATIQUES CULTURALES SUR LE RENDEMENT DU MIL

A. Alhassane [1☼], S.B. Traoré [1], B. Sarr [1], O.Diouf[2], M. Amadou [3], M. Dingkuhn[4], C. Baron[4], et M. Zouzou[5].

[1] Centre Régional AGRHYMET (Centre Régional de formation et d'applications en Agrométéorologie et Hydrologie opérationnelles), Tel : (227) 73 31 16, B.P 11011, Niamey, Niger

[2] CERAAS (Centre d'Etudes et de Recherches pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse), Tél : (221) 951 49 93 / 94, Fax : (221) 951 49 95, BP 3320 Thiès Escale, Sénégal

[3] INRAN (Institut National de Recherche Agronomique du Niger), Tel : (227) 72 53 89, B.P : 429 Niamey, Niger

[4] CIRAD-AMIS / Agronomie / Ecotrop, TA 40/01, Avenue Agropolis 34398 Montpellier cedex 5, France

[5] Laboratoire de Physiologie végétale de l'UFR Biosciences à l'Université de Cocody, Tel : (225) 22 44 03 07, 22 B.P : 852 Abidjan, Côte d'Ivoire

[☼] Auteur de correspondance : a.alhassane@agrhymet.ne

RESUME

Le Centre Régional AGRHYMET assure le suivi opérationnel des campagnes agricoles et la prévision des rendements de mil dans les pays du Sahel à l'aide du modèle DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures). Ce modèle permet aux autorités de ces pays ainsi qu'à leurs partenaires d'anticiper les crises alimentaires et d'atténuer leurs effets sur les populations. Toutefois, dans les conditions où l'eau n'est pas un facteur limitant, les performances de ce modèle se sont avérées limitées, ce qui a conduit au développement du modèle SARRA-H intégrant le bilan carboné. L'objectif de ce travail est d'évaluer ce nouvel outil dans des conditions de culture contrastées. Pour cela, des essais agronomiques ont été menés pour collecter des données sur la variété de mil ZATIB soumise à différents niveaux de fertilisation azotée, de densité de semis et de régime hydrique pendant les saisons pluvieuses de 2002 et 2003 à Niamey et pendant la contre-saison 2004 à Bambey, Sénégal. Les mesures ont porté aussi bien sur les variables météorologiques que sur la phénologie, l'accumulation de biomasse aérienne et les composantes du rendement à la récolte. Les résultats obtenus en conditions d'alimentation hydrique optimale à Bambey ont servi à calibrer le modèle. Ceux obtenus sur le même essai en situations de stress hydriques, et à Niamey ont servi à sa validation. Les résultats de Bambey ont montré une adéquation nette entre valeurs observées et simulées en biomasse aérienne et en rendements grains. Ceux de Niamey ont quant à eux donné des écarts souvent grands, du fait de la variation de la fertilité du sol et de ses impacts selon le régime hydrique et la densité de semis. Des ajustements des paramètres du modèle, notamment du coefficient de conversion de la lumière (ε_{btot}), ont permis d'avoir une réduction satisfaisante des écarts entre rendements simulés et observés. Ces résultats montrent qu'une amélioration simple du modèle semble possible pour prendre en compte les effets fumures.

Mots clés : Modélisation, pratiques culturales, prévision des rendements, mil (*Pennisetum glacum* [L.] Br), alerte précoce, sécurité alimentaire

INTRODUCTION

Dans le cadre du suivi opérationnel des campagnes agricoles dans les pays du Sahel, le Centre Régional AGRHYMET (CRA) du Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS), développe et utilise des outils d'alerte précoce pour permettre aux autorités politiques des pays membres, ainsi qu'à leurs partenaires d'anticiper les crises alimentaires et d'atténuer leurs effets sur les populations. Un des principaux outils utilisés à cet effet est le modèle de Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC) basé sur la simulation du bilan hydrique (Forest, 1984 ; Girard *et al.*, 1994). Développé au Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), France, puis transféré au CRA, ce modèle est utilisé pour prévoir les rendements du mil (*pennisetum glaucum* [L.] Br) au Sahel deux à trois mois avant les récoltes. Toutefois, l'approche bilan hydrique sur laquelle il est basé ne permet pas de bien simuler les rendements dans des conditions où l'eau n'est pas un facteur limitant, ce qui a conduit au développement du modèle SARRA-H qui, à terme, devra remplacer le DHC.

En effet, SARRA-H est un modèle simplifié de simulation des rendements des cultures annuelles (mil, sorgho, etc.) qui intègre désormais un bilan carboné de la plante et sa phénologie (Sultan, 2002). Il simule les rendements potentiels et réels des céréales comme le mil et reproduit assez fidèlement le développement de la plante dans des conditions optimales de culture (Dingkuhn *et al.*, 2003). Cependant, il doit encore être validé pour les conditions et pratiques culturales rencontrées en milieu paysan. Le présent travail s'inscrit dans ce cadre et a pour objectif de tester le modèle SARRA-H avec les résultats expérimentaux obtenus sur le mil soumis à différents niveaux des facteurs comme le régime hydrique, densité de semis et de fertilité du sol. En fonction des écarts qui sont observés entre observations et simulations, des propositions de corrections du paramètre de taux de conversion sont proposées, en se rapportant tant à la densité de semis qu'au niveau de fertilité du sol et d'apport de fumure.

MATERIEL ET METHODES

Des essais agronomiques ont été conduits pendant les saisons hivernales 2002 et 2003, dans le domaine du CRA, Niger (13° 29' N, 02° 10' E) et la contre-saison 2004, dans la ferme du Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) à Bambey, Sénégal (14° 42' N et 16° 28' O).

Le matériel végétal utilisé dans tous les essais est la variété de mil ZATIB de durée de cycle d'environ 105 jours et adoptée dans la zone soudano-sahélienne du Niger.

Au CRA, dans un premier essai les facteurs étudiés étaient la densité de semis (2 densités : 16666 et 31250 plants ha^{-1}) et la fertilisation azotée (2 doses : 0 et 100 kg ha^{-1}). Dans un deuxième essai, où la densité de semis était de 20000 plants ha^{-1}, la même variété ZATIB était testée avec 2 autres variétés vis-à-vis de la fertilisation azotée (doses 0 et 100 kg ha^{-1}).

A Bambey, les deux facteurs étudiés étaient la densité de semis (2 densités : 16666 et 31250 plants ha^{-1}) et le régime hydrique (3 régimes : conditions optimales (ETM) durant tout le cycle, stress provoqués pendant la montaison (S1), et pendant la floraison (S2)).

Au semis, tous les traitements ont reçu 100 kg ha^{-1} d'engrais sous forme de NPK (15-15-15, à Niamey et 15-10-10, à Bambey), apportée localement aux poquets; puis d'urée apportée en 2 tranches (au tallage et à la montaison) aux doses de 0 et 100 kg ha^{-1} selon les traitements azotés, à Niamey et de 100 kg ha^{-1} pour la faible densité de semis et 140 kg ha^{-1} pour la forte, à Bambey. Les stress hydriques ont été appliqués entre le 39e et le 53e JAS pour S1 et le 56e et le 70e JAS pour S2.

Mesures et observations

Une station météorologique automatique a été installée dans chaque site pour mesurer, aux pas de temps horaires et journaliers, la pluviométrie et les autres paramètres météorologiques entrant dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ET_0), température, vitesse du vent, radiation, humidité relative. Les autres mesures et observations ont consisté au suivi de l'accumulation de biomasse aérienne, la phénologie et la détermination des composantes du rendement final, et le poids de 1000 grains.

Paramétrage et validation du modèle SARRA-H

Le calibrage du modèle SARRA-H a été effectué sur sa dernière version (V3.0.0.0). Au cours de l'opération, certains paramètres du modèle n'ont pas été modifiés. Par contre, d'autres ont été soit ajustés dans les limites des intervalles de variation définis pour le mil (manuel d'utilisation SARRA-H V2.3), soit calculés à partir des données expérimentales collectées pendant la contre-saison 2004, à Bambey. Les données, obtenues sur le même essai en situations de stress hydriques, ont servi à la validation du modèle, en même temps que celles recueillies pendant les saisons pluvieuses 2002 et 2003, au CRA. Les paramètres modifiés sont les suivants :

- La vitesse d'enracinement selon les phases phénologiques de la levée, la BVP (levée-initiation paniculaire), la RPR (initiation paniculaire-floraison), la Matu1 (Floraison-grains laiteux) et la Matu2 (dessiccation des grains) ;
- Le coefficient de conversion de l'énergie lumineuse interceptée (ε_{btot}) : il traduit l'augmentation de la biomasse totale et de la respiration de maintenance (RespMaint). Chez les céréales, sa valeur dépend du niveau de développement de la plante et peut atteindre jusqu'à 6 g $MJ^{-1}j^{-1}$ dans les conditions optimales de nutrition hydrique et azotée (Kiniry *et al.*, 1989).

En outre, une corrélation linéaire a été établie entre le quotient (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison. Cette relation n'est pas affectée par le stress hydrique et ne dépend que du stade de développement de la plante. Celle que nous avons établie pour la variété ZATIB est la suivante :

$$\text{BiomFeuil / BomAéro} = -9\text{x}10^{-5}\ \text{BiomAéro} + 0{,}67$$

Cette relation a été sensiblement la même que celle obtenue avec la variété de mil Souna3 (90 jours) testée pour le calibrage et la validation du même modèle en 1997-1998 à Bambey, Sénégal.
Le seuil de température (Tbase), à partir duquel la germination et le développement de la plante sont possibles, a été fixé à 11 °C (Ong et Montheith, 1984) pour le calcul des cumuls thermiques correspondants aux différentes phases phénologiques de la variété. la température de bornage Maximale (optimale) considérée dans SARRA-H est de 30 °C, tous surplus à cette valeur n'est pas intégré au calcul. En effet, le modèle gère les différentes phases phénologiques de la culture à travers des sommes thermiques (en °C jour), pour lesquelles des seuils ont été définis selon les phases (levée, BVP, RPR, $MATU_1$ et $MATU_2$). Dès que le seuil défini pour une phase donnée est atteint, le modèle passe à la phase suivante. La durée de chacune de ces phases est considérée constante pour une même variété, excepté la phase PSP (non prise en compte ici) dont la durée est fonction de la photopériode.
Pour la variété ZATIB du mil, les durées de ces phases ont été établies en temps thermique comme suit : 77 ° $jour^{-1}$ pour la levée, 322 ° $jour^{-1}$ pour la BVP, 647 ° $jour^{-1}$ pour la RPR, 405 ° $jour^{-1}$ pour la Matu1 et 112 ° $jour^{-1}$ pour la Matu2.
Notons aussi que le Kcmax (ou besoins maximaux en eau de la plante) maintenu dans le modèle SARRA-H est de l'ordre de 1,25, défini en conditions d'alimentation hydrique non limitante, pour une couverture complète du sol (LAI de 4 environ) (Sarr *et al.*, 1999). Il est considéré dans le modèle que la réduction de la transpiration foliaire commence à partir de la valeur de Pfactor de 0,50 à pour les mils (Sarr, 1997 ; Allen *et al.*, 1998 ; Sarr *et al.*, 1999). Le coefficient d'extinction de la lumière (K) a été maintenu à 0,50 et celui de la respiration de maintenance de la biomasse totale (RespMaint) à 0,01 kg ha^{-1} à partir de la température de 25°C (Penning de Vries *et al.*, 1989).

Variables d'entrée du modèle

Une fois le modèle calibré et validé, l'utilisateur n'emploie en entrée que des variables climatiques : la pluviométrie (mm j^{-1}) et la demande climatique journalière (mm j^{-1}) pour le bilan hydrique, la température minimale, moyenne et maximale (°C) du jour pour le calcul du temps thermique et la gestion de la phénologie, la durée de l'insolation (heures) ou le rayonnement global (MJ j^{-1}) pour déterminer l'assimilation du carbone, la vitesse du vent à 2 m du sol (m s^{-1}). Les variables agronomiques nécessaires à la simulation sont la date de semis (pour initialiser la simulation), la variété, la densité de semis (plants ha^{-1}), la latitude pour le calcul et la prise en compte de la photopériode, la réserve utile (RU) du sol (mm m^{-1}) pour le bilan hydrique.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Calibrage du modèle

Le calibrage du modèle a été fait à partir de données recueillies dans les parcelles de la faible densité de semis irriguées en ETM. La corrélation qui en est résultée a été très nette entre les valeurs observées et simulées en biomasse aérienne, en dehors du point de l'avant dernière observation qui a été surestimé par le modèle (Fig. 1). Le calibrage du modèle a également donné un rendement grains simulé (3151 kg ha^{-1}) très voisin du rendement réel obtenu (3119 kg ha^{-1}), soit une surestimation par le modèle de seulement 1,02 %.

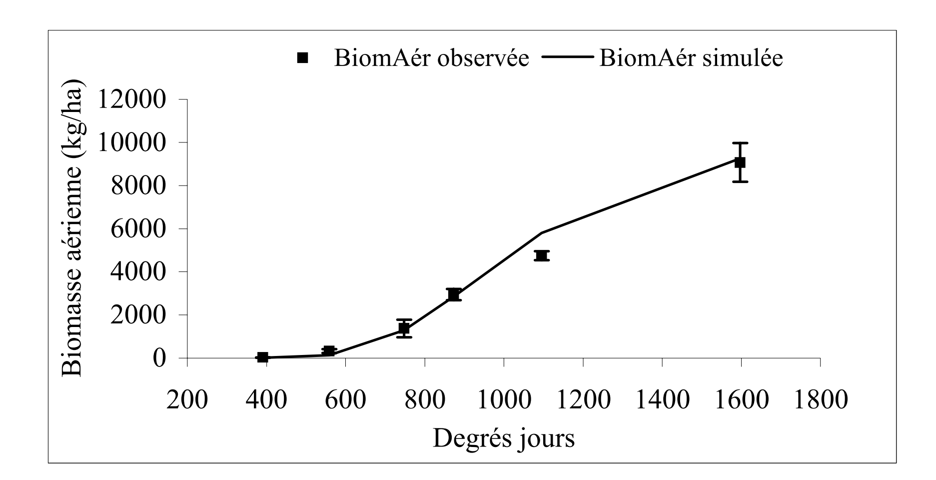


Figure 1 : Comparaison après calibrage des résultats simulés et observés en biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 16666 plants ha^{-1} en régime hydrique ETM. Bambey, contre-saison 2004.

Validation du modèle

- **Prise en compte de l'effet de la densité de semis**

Pour le même régime hydrique ETM à Bambey et en changeant uniquement le nombre de plants ha^{-1} dans le premier paramétrage (31250 plants ha^{-1} au lieu de 16666 plants ha^{-1}), le modèle a simulé assez nettement l'évolution de la biomasse aérienne jusqu'à la fin du cycle. Quant au rendement grain simulé pour ce traitement, il a été surestimé de 11 % par rapport au rendement réel qui était de 2746 kg ha^{-1}(tableau I). Cependant, ces légers écarts ne sont pas de nature à affecter la validité du modèle dans la prise en compte de l'effet de la densité du peuplement, dans ces conditions optimales de culture.

Effet du déficit hydrique

La validation du modèle pour les situations de déficit hydrique a donné des résultats relativement satisfaisants. En effet, pour toutes les deux densités de semis, les sorties du modèle en biomasse aérienne et en rendements grains ont montré des écarts globalement négligeables par rapport aux résultats observés, aussi bien avec le stress hydrique S1 qu'avec S2 (tableau I). Cependant, ce tableau montre qu'en situation de déficit hydrique, l'écart entre rendements grains simulés et observés n'a pas changé avec la faible densité de semis (0.1 %) mais, avec la forte densité, il a atteint 15 %. Ceci montre que le modèle ne tient pas compte, dans sa version actuelle, du fait que le mil a besoin de plus d'eau, donc devient plus vulnérable au déficit hydrique quand il est semé à une forte densité (OMM, 1993).

Tableau I : Comparaison entre les rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H, pour 3 régimes hydriques (ETM, S1 et S2) et 2 densités de semis (D1 = 16666 plants ha^{-1} et D2 = 31250 plants ha^{-1}) de la variété de mil ZATIB. Bambey, contre-saison 2004.

Essai	Traitements	Rdts observés	Rdts simulés	Ecart du simulé par rapport à l'observé (%)
Contre-saison Bambey 2004	**ETMD1***	3119	3151	+ 01
	ETMD2	2746	3037	**+ 11**
	S1D1	2509	2486	- 01
	S1D2	2193	2513	**+ 15**
	S2D1	1807	1666	- 08
	S2D2	1482	1573	+ 06

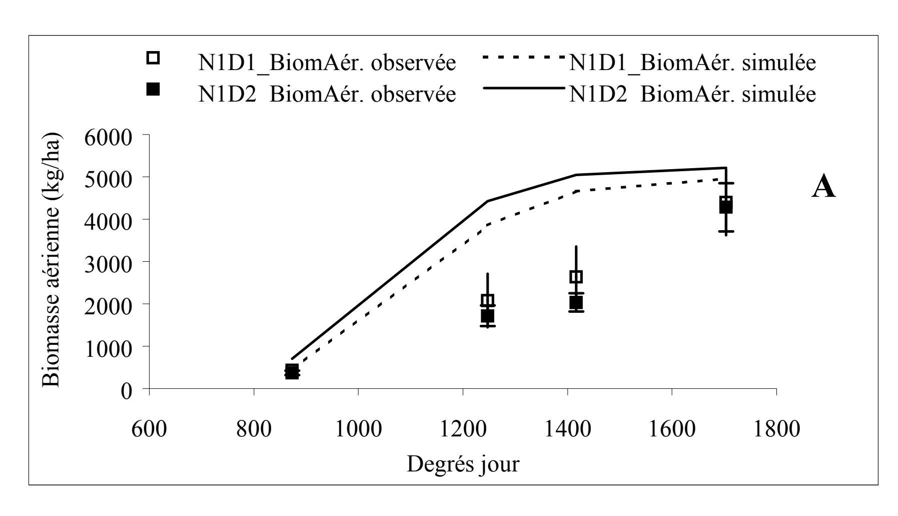
*Avec : * = traitement utilisé pour le calibrage*

- **Sensibilité du modèle aux conditions de culture au CRA de Niamey : effet de la pluviométrie, de la fertilité du sol, de la date et densité de semis**

Au CRA, les essais ont été menés sur cette variété en conditions pluviales, donc très contrastées compte tenu de la grande variabilité des pluies qui caractérise le Sahel (Sivakumar 1989). Ces conditions hydriques incertaines et aussi la très faible fertilité des sols lessivés des champs expérimentaux de ce centre (Denis *et al.*, 1984), n'ont pas permis à la variété ZATIB d'avoir des rendements en biomasse aérienne et en grains aussi élevés qu'à Bambey au Sénégal. Cette variation de la productivité de la variété est d'autant plus normale que le modèle SARRA-H devrait en tenir compte, à cause des différences entre les conditions pédo-climatiques des deux sites de culture. Les résultats obtenus ont fait ressortir quelques insuffisances du modèle sur ce plan.

Ainsi, en 2002, pour les mêmes densités de semis qu'à Bambey, les valeurs simulées en biomasse aérienne n'ont été proches de celles observées qu'en début et fin du cycle (figure 2A). Cela, du fait du déficit hydrique survenu vers le 70e JAS (1200 °C jour) en 2002 et dont l'effet était plus prononcé sur la biomasse observée que le modèle ne l'a ressorti dans les simulations. Les mêmes tendances ont été obtenues en 2003, mais avec des écarts encore plus élevés entre les résultats simulés et observés en biomasse aérienne (figure 2B). En effet, la variété a eu un développement moins important en 2003 du fait, non pas d'un déficit hydrique sévère, mais de la baisse de la fertilité du sol. L'augmentation des écarts observée en 2003 est donc liée au fait que le modèle ne tient pas compte du niveau de fertilité du sol.

Avec la densité de semis de 20000 plants ha^{-1}, les écarts entre valeurs observées et simulées de biomasse aérienne ont été plus faibles en 2002, de la levée au 70e JAS (après 1200 °C jour). Cependant, à partir de cette date, la biomasse aérienne observée a chuté sous l'effet du déficit hydrique, effet dont le modèle a sous-estimé l'impact (figure 3). En 2003, les données observées de cet essai ont eu plus d'écarts avec celles simulées, du fait toujours de la baisse de la fertilité du sol (figure 3). Les rendements grains observés et simulés ont évolué presque dans le même sens que la biomasse aérienne selon les différents essais, traitements et années d'expérimentation (tableau II). Ce tableau montre qu'en 2002, malgré l'impact du stress hydrique ayant perturbé la croissance des plants, les écarts entre les rendements grains simulés et observés ont été inférieurs à 11 %. En 2003, la correspondance entre rendements grains observés et simulés a été moins bonne à cause du même motif ayant affecté la biomasse aérienne, à savoir la baisse de fertilité du sol (tableau II).



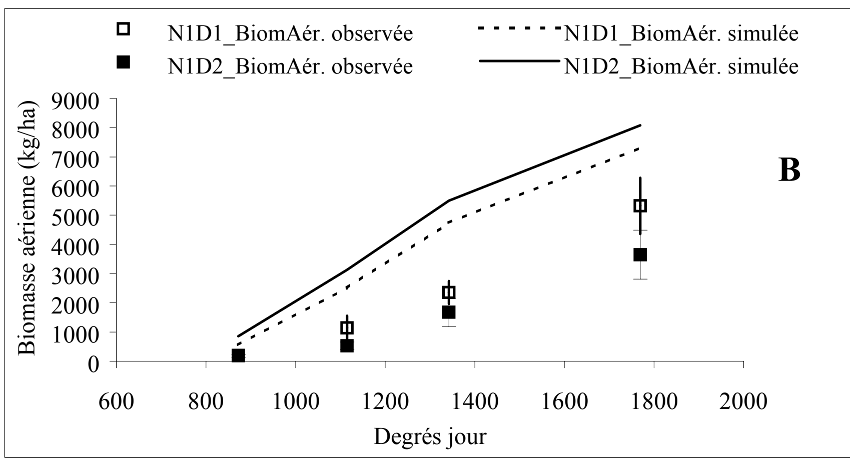


Figure 2 : Comparaison des résultats simulés et observés de biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB semée à deux densités de semis, (D1 : 16666 et D2 : 31250 plants ha^{-1}). Centre Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B).

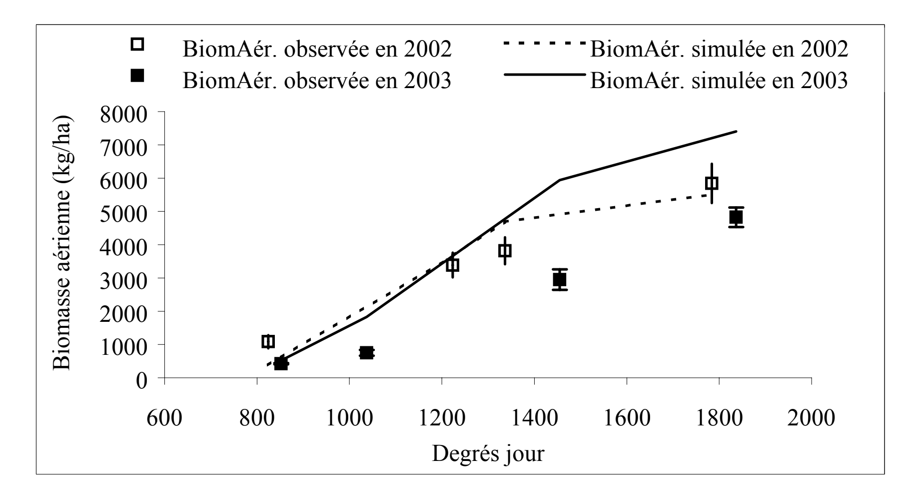


Figure 3 : Comparaison des résultats simulés et observés de biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB mil semée à 20000 plants ha^{-1}. Centre Agrhymet, 2002 et 2003.

Tableau II : Rendements grains observés et simulés par le modèle SARRA-H en fonction de la densité de semis, sous des conditions hydriques pluviales et sur un sol insuffisamment fertilisé en azote. Variété de mil ZATIB, Centre Agrhymet 2002 et 2003.

Année	Date de semis	Densité de semis (plants ha^{-1})	Rdts observés (kg ha^{-1})	Rdts simulés (kg ha^{-1})	Ecart du simulé par rapport à l'observé (%)
2002	**11-juillet**	**16 666**	1243	1250	+0,5
	11-juillet	**31 250**	1463	1310	-10
2003	**14-juin**	**16 666**	1134	1984	+75
	14-juin	**31 250**	1039	2366	+128
2002	**15-juillet**	**20 000**	1553	1502	-03
2003	**17-juin**	**20 000**	1593	2004	+25

Ajustement du modèle par rapport aux résultats expérimentaux du CRA

Dans cet exercice d'amélioration de l'adéquation entre rendements simulés et observés, seuls les aspects liés à la non prise en compte par le modèle de l'effet de la fertilité du sol sont abordés. Ainsi, l'ajustement des sorties du modèle a été fait sur la base du coefficient de conversion de la lumière en assimilats (ε_{btot}). Dans le paramétrage du modèle, la valeur initiale de ε_{btot} était de 5,0 g MJ^{-1} j^{-1}. Cette valeur a été optimale pour les résultats obtenus à Bambey, mais pas tout à fait pour ceux obtenus en 2002 et 2003 au CRA de Niamey. En effet, en 2002, hormis les quelques insuffisances dans la prise en compte de l'effet du déficit hydrique, la valeur 5,0 g MJ^{-1} j^{-1} de ε_{btot} a été acceptable pour la simulation des rendements des parcelles ayant bénéficié d'un apport d'azote (tableau II). Cependant, avec la baisse de la fertilité du sol en 2003, cette valeur de ε_{btot} s'est avérée élevée, du fait qu'elle a entraîné une surestimation des sorties du modèle tant en biomasse aérienne qu'en rendements grains. Nous avons donc procédé à des réductions successives de la valeur de ε_{btot} selon les traitements, jusqu'à obtenir une bonne adéquation avec les résultats observés.

- **Pour la situation de faible fertilité du sol en 2003**

Les ajustements des simulations, selon les résultats réels obtenus par les différents traitements d'azote et de densité de semis, ont permis de forcer le modèle à donner des sorties répondant aussi bien à l'effet négatif de la baisse de fertilité du sol, qu'à celui de la densité de semis dont l'augmentation a réduit le développement des plants, du fait de la pauvreté du sol.

Ainsi, avec une valeur de ε_{btot} = 4,6 g MJ^{-1} j^{-1}, la différence entre les sorties du modèle et les valeurs observées en biomasse aérienne a été moindre avec la faible densité de semis. Avec la forte densité, les écarts sont restés toujours élevés. Cela est contraire à ce qui a été observé à Bambey, où avec un sol assez fertile et le régime hydrique ETM, la biomasse aérienne et les rendements grains donnés par les 2 densités de semis ont été très proches des sorties du modèle, pour la même valeur de ε_{btot}. Ceci montre l'interaction entre la densité du semis et la faible fertilité du sol qui a fait que les plants de la forte densité de semis ont eu un développement plus réduit comme attesté dans OMM (1993), Affholder (1997) et Pandey *et al*., (2001). Cela n'est pas encore pris en compte dans le modèle. Il a fallu ramener la valeur de ε_{btot} à 4,3 g MJ^{-1} j^{-1}, pour réduire la différence entre valeurs observées et simulées en biomasse aérienne des plants de la forte densité de semis (figure 4).

Les résultats obtenus avec le second essai confirment cet état de fait. En effet, avec le niveau de la fertilité du sol relativement bon en 2002, les rendements observés ont été assez proches des sorties du modèle, avec la même valeur de ε_{btot} (5,0 g MJ^{-1} j^{-1}) retenue pour les conditions de culture à Bambey. Toutefois, avec la baisse de la fertilité du sol en 2003, la valeur de ε_{btot} a dû être ramenée à 4,6 g MJ^{-1} j^{-1} pour obtenir des valeurs simulées en biomasse aérienne plus proches de celles observées (figure 5).

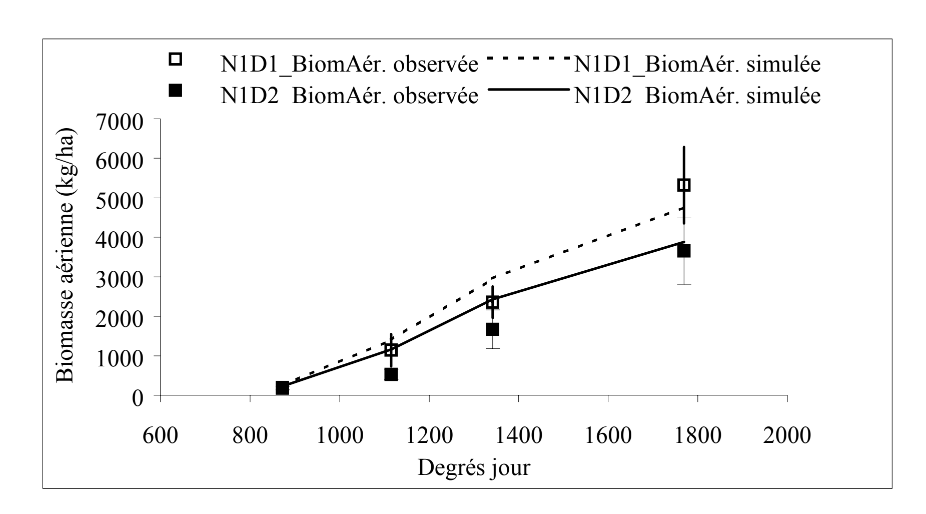


Figure 4 : Comparaison des résultats observés et simulés (ajustés avec ε_{btot} = 4,6 pour la faible densité et 4,3 g MJ^{-1} j^{-1} pour la forte) de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB selon la densité de semis. Centre Agrhymet, 2003.

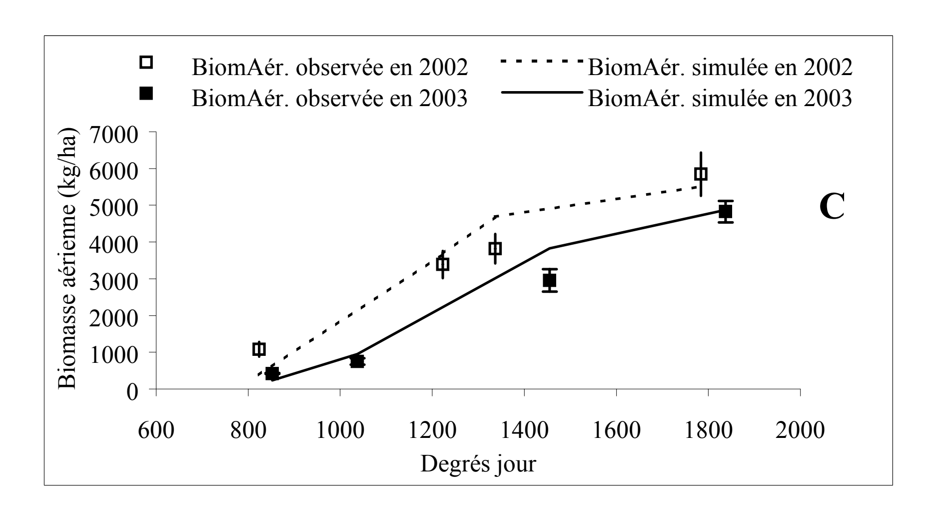


Figure 5 : Comparaison entre résultats observés et simulés (ajustés avec ε_{btot} = 5,0 en 2002 et 4,6 g MJ^{-1} j^{-1} en 2003) de la biomasse aérienne de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 20000 plants ha^{-1}. Centre Agrhymet, 2002 et 2003.

Tableau III : Rendements grains simulés (ajustés avec ε_{btot}) à ceux observés sous les effets de la densité de semis, en conditions hydriques pluviales et sur un sol modérément fertilisé en azote. Variété de mil ZATIB. Centre Agrhymet, 2003.

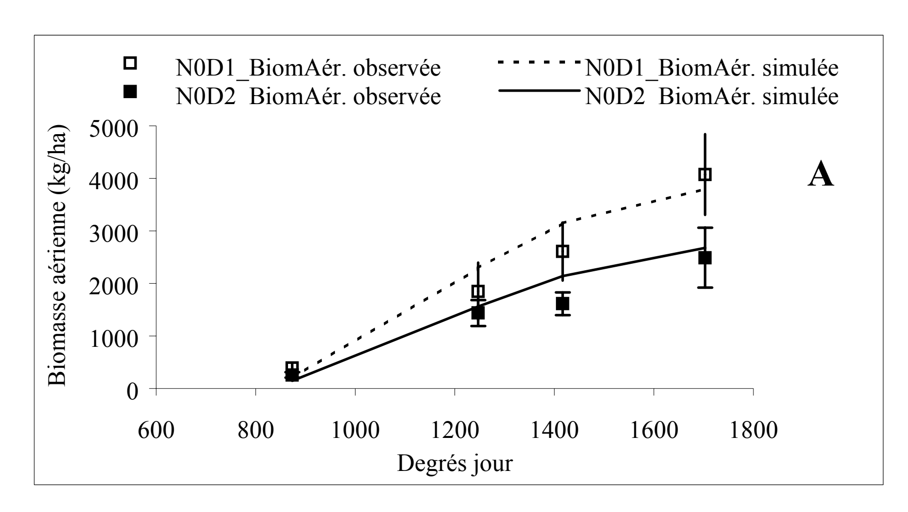
Année	Date de semis	Densité (plants ha^{-1})	Valeur de ε_{btot} (g MJ^{-1} j^{-1})	Rdts observés (kg ha^{-1})	Rdts simulés (kg ha^{-1})	Ecart par rapport à l'observé (%)
2003	**14-juin**	**16 666**	**4,6**	1134	1181	+ 04
	14-juin	**31 250**	**4,3**	1039	991	- 04
2003	**17-juin**	**20 000**	4,6	1593	1203	- 24

- **Pour les parcelles non fertilisées en azote**

Les ajustements des sorties du modèle ont été également faits pour les parcelles non fertilisées en azote (témoins). Différentes valeurs de ε_{btot} ont été obtenues aussi bien pour les deux années que pour les différentes densités de semis (figure 6A et B). Les résultats présentés par ces figures ont été obtenus avec des valeurs de ε_{btot} = 4,6 g MJ^{-1} j^{-1} pour la faible densité de semis (D1) et 4,2 g MJ^{-1} j^{-1}

pour la forte (D2), en 2002. Cependant, en 2003, Il a fallu baisser ces valeurs à 4,4 g MJ^{-1} j^{-1} pour la faible densité et 4,0 g MJ^{-1} j^{-1} pour la forte.

Ainsi, on peut noter que la simulation de la croissance de cette variété de mil, dans des situations de fertilité du sol aussi diverses que celles abordées dans ce travail, a nécessité l'introduction dans le modèle des valeurs de ε_{btot} variant de 5,0 g MJ^{-1} j^{-1}, pour les sols suffisamment fertiles, à 4,0 g MJ^{-1} j^{-1}, pour les sols extrêmement pauvres. En plus, en situation de faible fertilité du sol, la valeur retenue pour une faible densité de semis doit être diminuée pour une densité forte, afin de tenir compte de l'effet de la compétition plus grande pour les éléments nutritifs du sol. La sensibilité du niveau de développement de la culture à ε_{btot} a été confirmée par les résultats du second essai mené au CRA (figure 7). En effet, pour obtenir une correspondance acceptable entre la biomasse aérienne observée et celle simulée, il a fallu utiliser des valeurs de ε_{btot} de 4,6 MJ^{-1} j^{-1} en 2002 et 4,5 MJ^{-1} j^{-1} en 2003 (tableau IV). Ce tableau montre que pour des petites variations de ε_{btot}, les rendements grains simulés ont été dans la fourchette de -6 à +5 % par rapport à ceux observés selon l'année et le traitement de densité de semis.



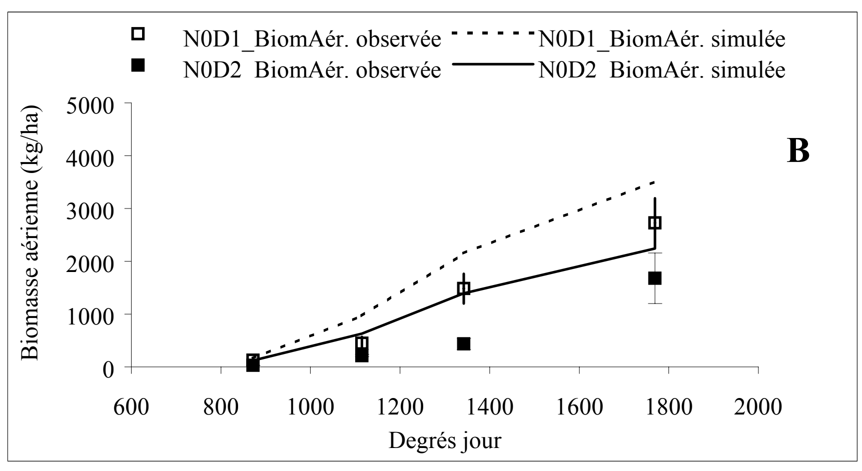


Figure 6 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustée avec ε_{btot}) de la variété de mil ZATIB semée aux densités D1 (16666 plants ha^{-1}) et D2 (31250 plants ha^{-1}) sur un sol non fertilisé en azote (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Centre Agrhymet, 2002 (A) et 2003 (B).

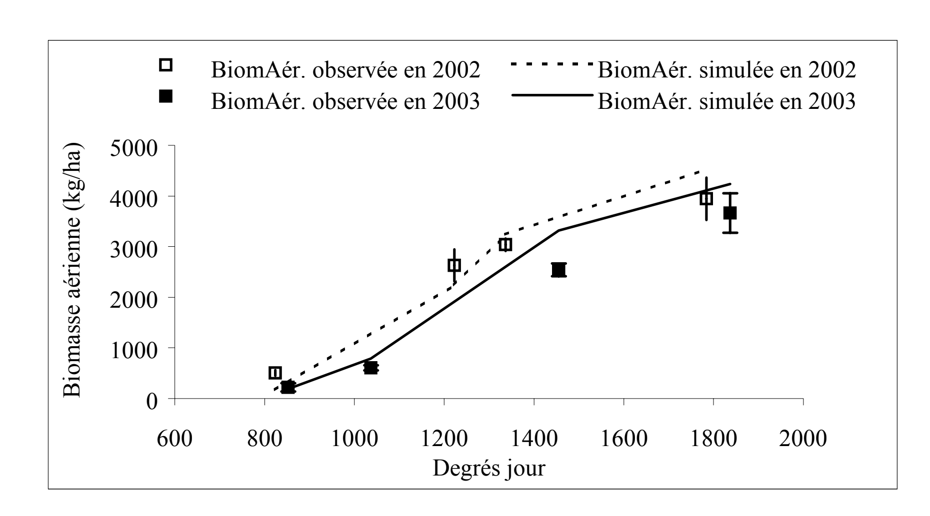


Figure 7 : Biomasse aérienne observée et simulée (ajustée avec ε_{btot} = 4,6 en 2002 et 4,5 en 2003) de la variété de mil ZATIB semée à la densité de 20000 plants ha^{-1} sur un sol non fertilisé en azote (N0) et sous un régime hydrique pluvial strict. Centre Agrhymet, 2002 et 2003.

Tableau IV : Ajustement (avec ε_{btot}) des rendements grains simulés rapport à ceux observés sous les effets de la densité de semis, en conditions hydriques pluviales strictes et sur un sol non fertilisé en azote. Variété de mil ZATIB. Centre Agrhymet, 2002 et 2003.

Année	Date de semis	Densité (plants ha^{-1})	Valeur de ε_{btot} (g $MJ^{-1}j^{-1}$)	Rdts observés (kg ha^{-1})	Rdts simulés (kg ha^{-1})	Ecart par rapport à l'observé (%)
2002	**11-juil**	**16 666**	4,6	1088	1017	- 06
	11-juil	**31 250**	4,2	699	737	+ 05
2003	**14-juin**	**16 666**	4,4	856	841	- 02
	14-juin	**31 250**	4,0	553	558	+ 01
2002	**15-juil**	**20 000**	4,6	1216	1242	+ 02
2003	**17-juin**	**20 000**	4,5	1036	1026	- 01

Conclusion et perspectives

Les résultats de nos divers essais ont permis d'évaluer les capacités du modèle SARRA-H de simulation de rendements des cultures. Bien que reproduisant assez fidèlement l'évolution de la biomasse aérienne dans les conditions optimales de fertilité du sol et d'alimentation en eau de la culture, ce modèle sous-estime néanmoins l'effet du déficit hydrique et celui de la faible fertilité du sol. Ces limites ont aussi été à la base d'insuffisances liées à la prise compte de l'effet de la densité de semis que le modèle était pourtant sensé pouvoir gérer. En effet, le modèle a comme principe d'attribuer toujours plus de biomasse et de rendements grains aux parcelles à plus fort nombre de plants. Or, cela ne s'est avéré valable que dans les conditions optimales de culture. Nos résultats, ainsi que ceux de Affholder (1997) ont montré que les faibles densités de semis sont plus favorables à la croissance et au développement de la culture que les fortes. Les séries d'ajustements, faites en faisant varier le coefficient ε_{btot}, ont permis de corriger les écarts et d'avoir des sorties du modèle très proches des valeurs observées dans diverses conditions. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de ε_{btot} pour corriger l'effet de la densité de semis dans les simulations, n'a paru nécessaire qu'en cas de faible fertilité du sol.

Les résultats de ce travail peuvent servir de base de révision des algorithmes de calcul et du paramétrage du modèle afin qu'il tienne compte des contraintes réelles du terrain, notamment celles liées à la variabilité des techniques culturales. Les investigations doivent en plus être poussées au-delà des parcelles expérimentales en vue de collecter une gamme de données plus représentatives des réalités du milieu paysan.

Bibliographie

Affholder, F. 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. Field Crops Research 52 (1997) : 79-93.

Allen, G. R.; L.S. Pereira; D. Raes et M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and drainage. Paper 56, 300 p.

Birch, J. 1990. Development and evaluation of a sorghum model based on CERES- Maize in semi-arid tropical environment. Field Crops Research; 24 : pp. 87-104.

Denis, J. J. ; M. Pfister, et A. Ganda. 1984. Suivi et production des cultures, Campagne 1983, Ferme expérimentale centre Agrhymet. P. 77.

Dingkuhn, M., C. Baron, V. Bonnal, F. Maraux, B. Sarr, B. Sultan, A. Clopes, and F. Forest. 2003. Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. P. 127-139 *in* Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide. (T.E. Struif Bontkes and M.C.S. Wopereis ed.) IFDC, Muscle Shoals, AL. USA.

Forest, F. 1984. Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Division Recherche - Développement Economie - Valorisation de l'Eau, Groupe eau, IRAT – CIRAD. P. 61.

Girard, X. ; C. Baron et B. Cortier. 1993. DHC4, Diagnostic Hydrique des cultures. Doc. Agrhymet, 37 p.

Kiniry, J.R. ; C.A. Jones ; J.C. O'Toole ; R. Blanchet ; M. Cabelguenne et D.A. Spanel. 1989. Radiation use efficiency in biomass accumulation prior to grain –filling for five grain-crop species. Field Crops Res. 20, 51-64.

OMM. 1993. L'agrométéorologie du mil (pennisetum glaucum (L) Leeke), rapport commission de météorologie agricole (CMAg) N° 56 , OMM/ TD N° 566, Genève, septembre 1993. 124 P.

Ong, C. K. et J. L. MONTEITH. 1984. Response of sorghum and pearl millet to drought stress in semi-arid India. Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. Proceedings of the international symposium. ICRISAT Center, Patancheru, India, 15-200 novembre.159-174.

Pandey, R. K. ; J. W. Maranville et Y. Bako. 2001. Nitrogen fertilizer response and use efficiency for tree cereal crops in Niger. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 32 (9 et 10):1465-1482.

Penning de Vries F.W.T.; D.M. Jansen, H.F.M. Ten Berge et A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological. Processes of growth in several annual crops. PUDOC Wageningen, The Netherlands; and International Rice Research Institute (IRRI), Philippines. 270 p.

Sarr, B. 1997. Etude des relations consommations hydriques et productivité chez la variété de mil Souna III (Pennisetum Glaucum (Leeke) R. Br.) cultivée au champ sous différentes conditions d'alimentation en eau. Rapport d'activité Ceraas/Isra, 16 p.

Sarr, B. ; S. Ndjendole ; O. Diouf ; M. Diouf et H. Roy-Macauley. 1999. Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. Sécheresse 10, 129-135.

Sivakumar, M. V. K., 1989. Exploiting rainy season potential from the onset of rains in sahelian zone of West Africa. Agricultural and Forest Meteorology, 51 (1990):321-332.

Sultan, B. 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles. Thèse de doctorat à l'Université Paris 7-Denis Diderot, UFR GHSS. P. 283.